第 37 卷第 21 期 生 态 学 报 Vol.37,No.21
2017 年 11 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Nov.,2017

DOI: 10.5846/stxb201608111644

张强,姚玉璧,王莺,王素萍,王劲松,杨金虎, 王静,李忆平,尚军林,李文举.中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策.生态学报,2017,37(21):7206-7218.

Zhang Q, Yao Y B, Wang Y, Wang S P, Wang J S, Yang J H, Wang J, Li Y P, Shang J L, Li W J.Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in Southern China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7206-7218.

中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策

张 强[1],姚玉璧[1,2,*],王 莺[1],王素萍[1],王劲松[1],杨金虎[1,2], 王 静[1],李忆平[1],尚军林[2],李文举[2]

1 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020

2 甘肃省定西市气象局,定西 743000

摘要:应用中国南方区域 14 省区市 252 个国家基本气象站 1961—2015 年逐日地面气象观测资料及干旱灾害资料,研究中国南方干旱灾害影响的时空变化特征,分析中国南方干旱灾害风险变化特征,提出干旱灾害风险防控策略与防御对策。结果表明:近 55 年中国南方区域降水量呈现波动变化,降水量线性拟合趋势特征不明显。但进入 21 世纪后南方区域平均降水量明显偏少,且平均降水量年际振荡幅度增大。近 55 年研究区气温呈显著上升趋势,南方平均地表气温升高速率高于全球地表升温速率;研究区气温从 1976 年开始持续上升,气温升高的突变年在 1997 年。重旱风险高发区主要集中于西南,随着气候变暖,干旱灾害频率、强度和受旱面积均增加,干旱灾害风险增大。气温突变后次高干旱灾害风险区明显扩大。未来 10 年(2016—2025 年)中国南方地区的干旱发生频率可能升高。因此,要加强干旱灾害风险管理,生态环境脆弱区域实施生态环境修复,农业主产区域以保障粮食安全为主,解决水资源时空分布不均和资源供需加剧矛盾,提高干旱灾害风险防控水平。

关键词:干旱;灾害风险;空间特征;对策;中国南方

Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in Southern China

ZHANG Qiang[1], YAO Yubi[1,2,*], WANG Ying[1], WANG Suping[1], WANG Jinsong[1], YANG Jinhu[1,2], WANG Jing[1], LI Yiping[1], SHANG Junlin[2], LI Wenju[2]

1 *China Meteorological Administration Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster/Gansu Province Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster/Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou* 730020, *China*

2 *Meteorological Bureau of Dingxi City, Dingxi* 743000, *China*

Abstract: Using daily surface meteorological observation and drought disaster data from 252 national basic meteorological stations located in 14 provinces in Southern China from 1961 to 2015, temporal-spatial variation characteristics of drought disaster influence and the risk change of drought disaster were studied. Based on these analyses, the control strategy and defense countermeasures for drought disaster risks are put forward. The results indicated that annual precipitation in Southern China fluctuated from 1961 to 2015 and no obvious linear trends. However, the average annual precipitation in Southern China is less than that in the period before 21st century, and its oscillation amplitude is increasing. The annual average temperature in the research region showed significant upward trend throughout 1961—2015, and the average surface temperature increasing rate was higher than that of the global average. The temperature has increased since 1976 in the

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430206);公益性行业(气象)科研重大专项(GYHY201506001-6);国家自然科学基金(41575149)

收稿日期:2016-08-11; **网络出版日期:**2017-07-11

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: yaoyubi@163.com

research region, and a temperature mutation point occurred in 1997. Areas with higher risks of drought disaster include most regions in southwest China. With the global warming, the drought frequency and intensity and the drought affected areas have been increasing, as well as the risk of drought disaster. The risk area of secondary high drought disaster was significantly enlarged after the temperature mutation point in 1997. During the next 10 years (2016—2025), the drought disaster frequency in Southern China could increase. Therefore, the following management measures should be carried out: (1) drought disaster risk management should be strengthened; (2) areas with fragile ecological environment should be restored; (3) major agricultural production areas should be given priority for food production security; (4) the uneven temporal-spatial distribution of water resources and aggravating contradictions between supply and demand should be resolved; and (5) the level of drought disaster risk prevention and control should be improved.

Key Words: drought; disaster risk; spatial characteristic; countermeasure; Southern China

人类从诞生伊始就遭受干旱灾害的困扰,干旱灾害与地球环境相伴而生,是全球均可发生的自然灾害[1-2]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,在21世纪,全球水循环响应气候变暖的变化将不是均匀的。尽管有可能出现区域异常情况,但潮湿和干旱地区之间、雨季与旱季之间的降水对比度会更强烈。到21世纪末,在高(RCP 8.5)温室气体排放情景下,位于中纬度干燥地区和副热带的干燥地区,平均降水将减少。在区域到全球尺度上预估的土壤水分是减少,目前为干旱区的农业干旱可能性(中等信度)会增加[3-4];随着未来气候变暖,水循环会进一步加快,植物的蒸腾和地表的蒸散等水分平衡随之变化,农业生产的不稳定性和风险加大[5]。例如,2016年2—3月,地处东南亚的湄公河流域气温偏高1—3℃,降水稀少,越南南部遭遇近百年来的严重干旱,该区域以栽培水稻为主,需水量较大,干旱影响尤为严重,湄公河三角洲区域农业严重受灾。

中国是干旱灾害频繁发生的国家之一,每年平均农业受旱面积为 2.4×10^7 hm^2,20世纪末以来,中国农业干旱发生频率增多、强度增强、危害更大。1997、1999—2002、2009年北方出现区域性大旱;2003年和2004年江南、华南遭受严重区域性干旱;2006年川渝地区出现百年一遇的大旱;2010—2013年西南地区连续4年出现干旱;2011年1—5月,长江中下游地区降水为近50年来历史同期最少,无降水日数为1961年以来历史同期最大,受干旱影响范围为近60年来同期最广[6-8]。

气候变暖不仅使干旱灾害危害加重、形成机理和发展过程更加复杂,而且也使影响干旱灾害风险的因素更加复杂多样[9-11]。农业旱灾综合损失率与降水量成负相关,年降水量每减少100 mm中国南方综合损失率大约增大0.76%[12]。降水量偏少的区域,致灾因子危险性偏高,农业旱灾综合损失率增大。承灾体脆弱性偏高的区域如云贵高原主体,农业旱灾综合损失率偏高[13]。中国西南的四川盆地、贵州东北部和云南大部,华南的广西北部、广东西部是干旱灾害高风险的区域[14-16]。

中国干旱灾害防御的传统模式主要是应急方式的危机管理,即在灾情出现后才临时组织和动员公共和社会力量投入防灾减灾。而不是在干旱灾害发生前就进行机制化和制度的预防,容易出现“过度”应对或应对“缺失”。随着干旱灾害频发和经济社会发展对防灾减灾要求的提高,要求对干旱灾害从应急管理转向更加重视风险管理[17]。要实现干旱灾害风险管理必须对干旱灾害风险识别为前提,以干旱灾害风险评估和预警技术的发展为重要技术支撑。目前对我国南方干旱灾害风险特征和规律认识十分有限,而且气候变暖引起的干旱灾害风险因子变异使干旱风险评估的技术问题更加复杂[18-21],致使干旱灾害风险管理缺乏必要技术支撑[20],研究南方干旱灾害风险特征既有迫切需求,又是突出科学问题!

分析气候变暖背景下南方干旱灾害风险的物理要素变化规律,研究干旱灾害风险时空变异特征,提出针对性地干旱灾害风险应对策略与防控措施,对应对气候变化,提高干旱灾害防灾减灾能力有重要意义。

1 研究区域与数据分析方法

1.1 研究区域

中国南方一般是指秦岭-淮河一线以南和青藏高原以东的区域,属于西南季风和东南季风区的南部。选取中国南方14省区市(广东、福建、浙江、海南、广西、云南、四川、重庆、贵州、湖南、湖北、江西、安徽、江苏)为研究区域(由于青藏高原地形、地貌和区域气候特征的特殊性,其于南方其他区域差异显著,难以归为同一区域分析研究,故研究区域不包括青藏高原)。区域空间范围为97.4°—123.0°E,20.2°—35.3°N。研究区域主要以亚热带季风气候为主,年降水量主要分布在600—2700 mm,年平均温度在16—24℃。

1.2 研究数据

研究站点选取原则是空间代表性好、年代连续一致,选取中国南方14省区市(广东、福建、浙江、海南、广西、云南、四川、重庆、贵州、湖南、湖北、江西、安徽、江苏)256个国家基本气象站1961—2015年逐日地面气象观测资料。干旱受灾面积数据为1951—2015年农业部农作物干旱受灾面积数据。

1.3 数据分析方法

气候要素的趋势倾向率[21]

$$X_i = a + bt_i (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

式中,X_i为气候要素变量,用t_i表示X_i所对应的时间;a为回归常数;b为回归系数;n为样本量。b的10 a变化称为气候倾向率。

气温升高突变检测采用累积距平分析方法和Mann-Kendall突变检测法[21]。M-K突变检测法是在原假设H_0:气候序列没有变化的情况下,设此气候序列为$x_1, x_2, \ldots x_N$,m_i表示第i个样本x_i大于x_j($1 \leqslant j \leqslant i$)的累计数,定义一统计量,给定一显著性水平$\alpha_0$,当$\alpha_1 > \alpha_0$时,接受原假设$H_0$,当$\alpha_1 < \alpha_0$时,则拒绝原假设,它表示此序列将存在一个强的增长或减少趋势,组成一条顺序统计曲线UF,通过信度检验可知其是否有变化趋势。把此方法引用到反序列中,将组成一条逆序统计曲线UB;当曲线UF超过信度线,既表示存在明显的变化趋势时,如果曲线UF和UB的交叉点位于信度线之间,这点便是突变的开始点。

1.4 干旱灾害风险评估方法

干旱灾害风险评估是对干旱灾害风险发生的强度和形式进行评定和估计。干旱灾害评估主要是指灾后影响评估,干旱灾害风险评估主要是对可能灾害风险的预评估,带有预测性质。干旱灾害风险评估方法是建立在对干旱灾害风险形成机理认识基础上的,传统灾害风险理论重点关注了自然环境因素,即充分认识到灾害形成的客观因素,形成的评估结论属相对稳定的静态结论。本文在IPCC灾害风险形成机理[4]的基础上,引入了气候变化和人类活动的影响并考虑到孕灾环境的敏感性,提出了一个新的灾害风险形成机理概念模型(图1)。概念模型引入气候变化和人类活动的影响后能全面、客观表征出干旱灾害风险的形成机理,反映出干旱灾害风险的可变性与动态过程特征。其形成的干旱灾害风险评估特征更加科学、客观,更接近干旱灾害风险的本质特征。

根据干旱灾害风险形成机理概念模型可将干旱灾害风险系统分解为致灾因子危险性(h)、承灾体暴露度或脆弱性(e)、孕灾环境的敏感性(s),即,干旱灾害风险指数 = 致灾因子危险性∩承灾体的暴露度或脆弱性∩孕灾环境的敏感性。可构建干旱灾害风险的表达式:

$$Rd = f(h, e, s) = f1(h) \times f2(e) \times f3(s) \quad (2)$$

采用层次分析法对干旱灾害风险元素进行分解。元素分解的基本原则是被分离元素间应该是相互独立的。因为只有独立的变量才能够分离,其解才能成为独立变量函数的乘积。因此干旱灾害风险评估方法如下:

$$Rd = Hd \cdot Eb \cdot Ve \cdot Vf \cdot Pc \quad (3)$$

式中,Rd为干旱灾害风险;Hd为干旱致灾因子的强度和概率;Eb是承灾体的社会物理暴露度(考虑自然环境

条件);*Ve* 为承灾体脆弱性;*Vf* 是孕灾环境的敏感性;*Pc* 为应对和恢复力(防灾减灾能力)。根据加权综合评价法分别建立评估模型[13,15]。

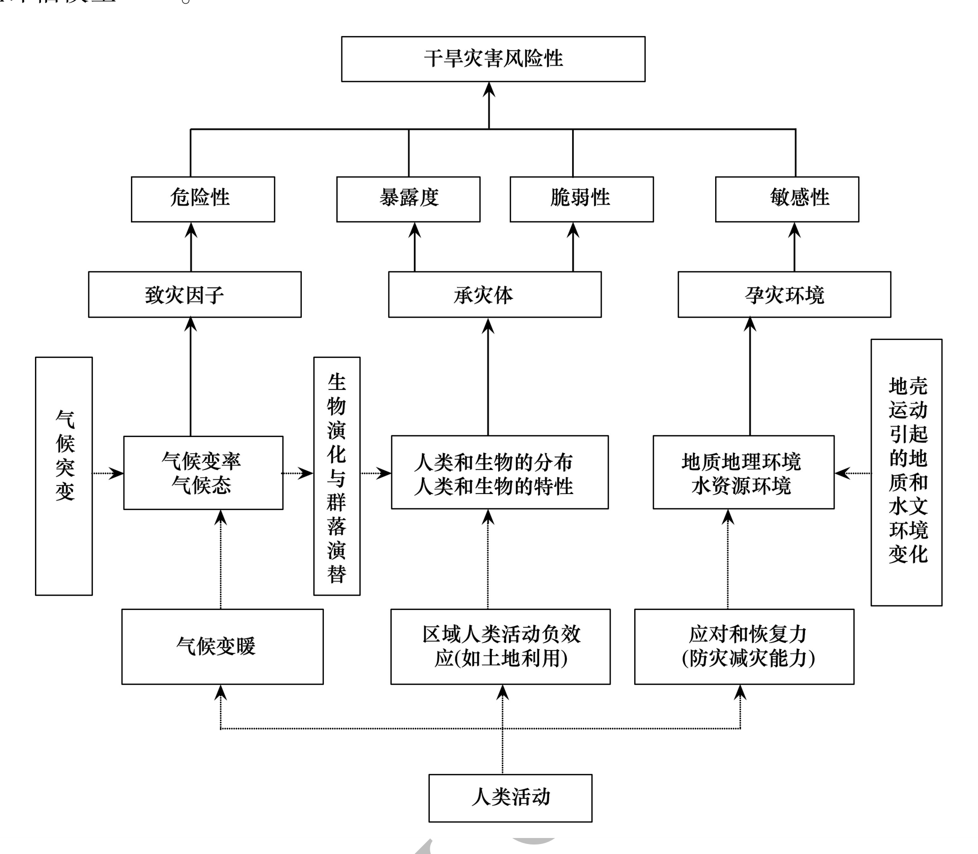


图 1　干旱灾害风险形成机理概念模型

Fig.1　The conceptual mode for formation mechanism of drought disaster risk

1.5　空间分布表达方法

干旱灾害风险分布特征根据统计计算数据,应用反距离权重法(IDW, inverse distance weighted interpolation)进行空间分布内插;空间栅格数据生成时,设定 Cell size 参数为 0.005;用 ArcGIS 软件生成图件。

2　气候变化及干旱灾害风险特征

2.1　气候变化背景分析

2.1.1　降水量

1961—2015 年南方研究区逐年降水量呈现波动变化(图 2),历年降水量线性拟合趋势特征不明显,未通过相关分析显著性检验(P>0.10)。南方区域历年最大年平均降水量为 1530.7 mm,出现在 1973 年;区域历年最小年平均降水量为 1095.8 mm,出现在 2011 年。区域平均降水量距平百分率在-17.6%—15.0%之间变化。20 世纪 60 年代区域平均降水量偏少幅度较大,区域平均降水量距平百分率为-2.5%(表 1),区域平均降水量变异系数为 6.9%; 20 世纪 70 年代到 80 年代平均降水量偏少幅度较小,70 年代平均降水量距平百分率为-0.5%,变异系数为 8.3%; 80 年代平均降水量距平百分率为-0.7%,变异系数为 6.3%;90 年代平均降水量偏多幅度最大,平均降水量距平百分率为 2.5%,变异系数为 4.4%;21 世纪初的 10 年平均降水量明显偏少,平均降水量距平百分率为-1.8%,变异系数为 8.3%。2010—2015 年平均降水量也偏少,变异系数更大。

由此可见,进入 21 世纪后南方区域平均降水量明显偏少,且平均降水量年际振荡幅度增大。

2.1.2　气温

1961—2015 年南方研究区历年气温呈显著上升趋势(图 2),气温曲线线性拟合气候倾向率为 0.192℃/

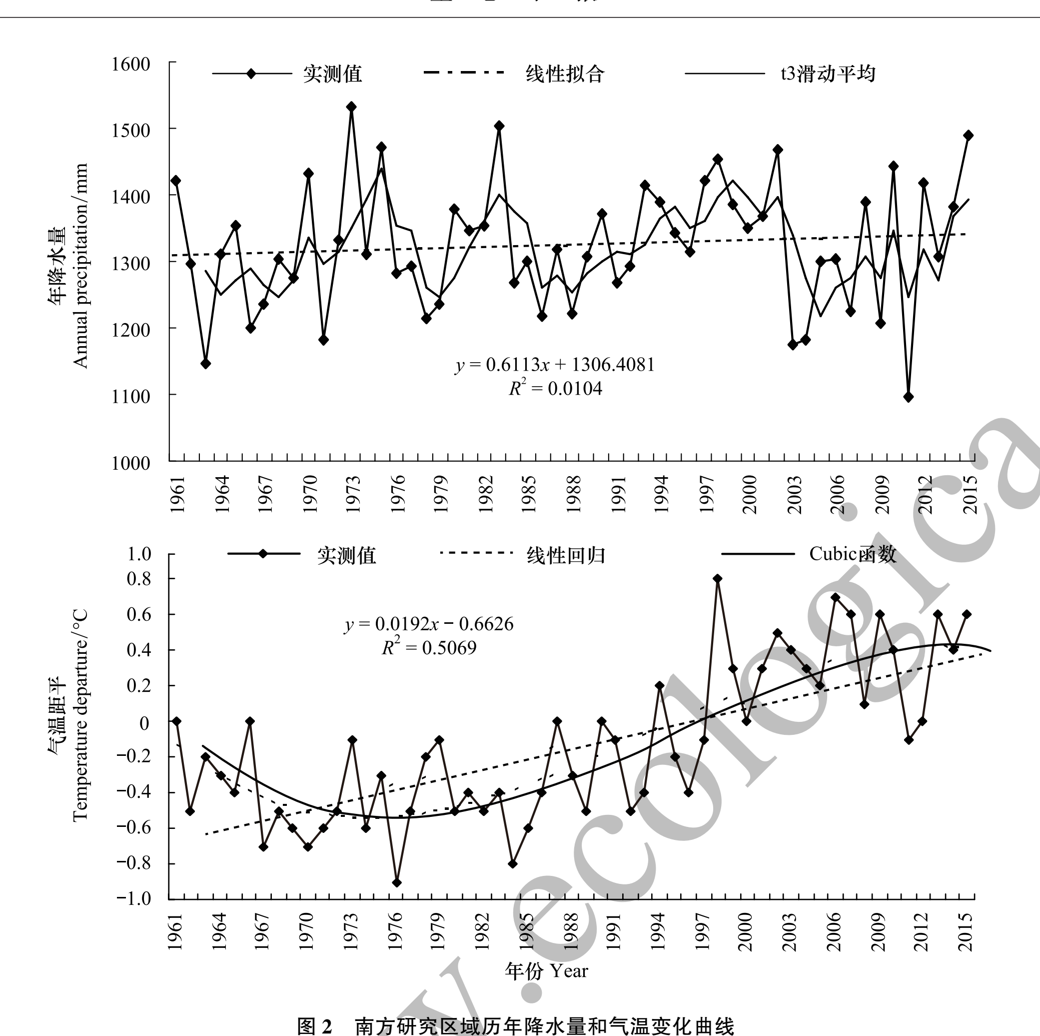


图 2 南方研究区域历年降水量和气温变化曲线

Fig.2 The annual precipitation and temperature departure change for the study area in Southern China

10a,相关分析信度检验达极显著水平(P<0.001),南方平均地表气温升高速率高于全球地表升温速率[2]。南方平均气温距平 Cubic 函数在 20 世纪 60 年代有所下降,70 年代后持续上升,Cubic 函数拟合方程为 $y = -0.00003x^3 + 0.0033x^2 - 0.0747x - 0.0625$,对其线性化后的复相关系数 R=0.806(P<0.001),对 Cubic 函数求导,令 dy/dt=0,可求导 1975 年之后气温持续上升。

南方研究区平均气温在 20 世纪 80 年代前均为负距平,其距平值为-0.4℃,之后距平≥0℃,且变异系数增加,气温振荡幅度加大。

表 1 南方研究区各年代际降水量距平百分率及气温距平

Table 1 Every decadal anomaly percent of precipitation and temperature departure for the study area in Southern China

年代 Years	降水量 Precipitation		气温 Temperature	
	距平百分率/% Anomaly percent of precipitation	变异系数 Coefficient variation	距平/% Departure	变异系数 Coefficient variation
1961—1970 年	-2.5	6.9	-0.4	1.6
1971—1980 年	-0.5	8.3	-0.4	1.5
1981—1990 年	-0.7	6.3	-0.4	1.5
1991—2000 年	2.5	4.4	0.0	2.3
2001—2010 年	-1.8	8.3	0.4	1.1
2010—2015 年	-0.3	9.2	0.4	1.6

为了进一步分析近 55 年来南方气温升高的突变特征,采用累积距平曲线变化分析方法和曼-肯德尔

(Mann-Kendall)突变检测两种方法进行气温升高突变特征检测。

南方研究区气温累积距平变化曲线(图 3a)表明,1961—2015 年气温累积距平呈明显的先降后升的“V”型特征,1961—1996 年气温累积距平下降,1997—2015 年气温累积距平上升,可初步确定 1997 年左右为气温升高突变点。

南方研究区气温 Mann-Kendall 突变检测曲线(图 3b)显示,1961—2015 年气温距平 M-K 检测顺序统计量 UF 从 1976 年开始持续上升(与气温 Cubic 函数拟合方程 dy/dt = 0 的点基本吻合),在 21 世纪初大大超过显著性水平临界线($u_{0.05}$ = 1.96, P = 0.05),甚至超过了极显著水平($u_{0.001}$ = 3.29, P = 0.001)。由此可知,南方研究区气温升高的趋势通过了显著检验,且呈极显著水平。同时,UF 和 UB 曲线的交点介于临界线之间,其交叉点(1997 年)即可确定为气温变化突变开始点。

上述气温趋势分析、累积距平曲线变化分析和 Mann-Kendall 突变检测分析一致显示,近 55 年南方研究区气温从 1976 年开始持续上升,气温升高的突变年在 1997 年。

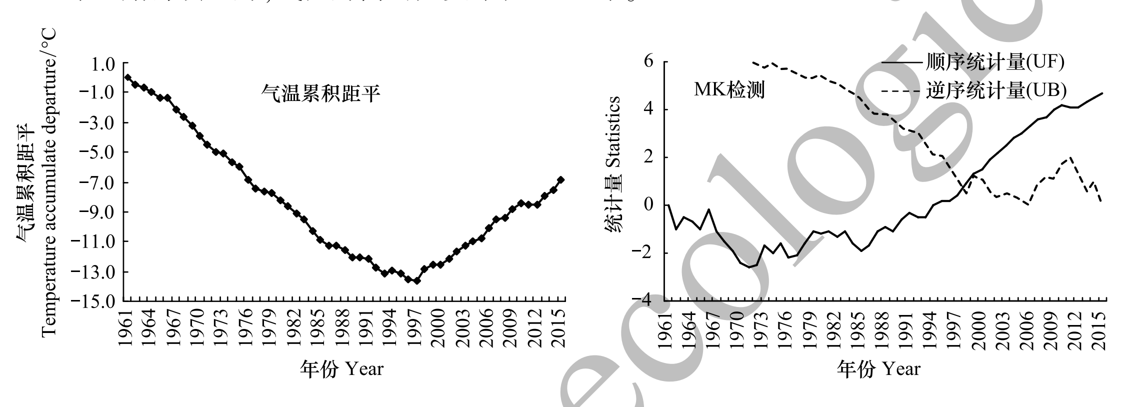


图 3　南方研究区气温累积距平及 M-K 检测曲线

Fig.3　The curve of temperature accumulate departure and Mann-Kendall checkout for the study area in Southern China

2.2　干旱灾害变化特征

2.2.1　干旱受灾面积区域分布

研究区域降水量减少,气温升高,干旱灾害风险加大。南方农业在我国占有非常重要的地位,水稻播种面积占全国总面积的 81.2%;冬小麦播种面积占 34.9%,玉米播种面积占 20.5%。1951—2014 年历年平均受旱面积区域差异显著(图 4),其中,四川省年平均受旱面积最大,为 134.4×10^4 hm^2,占南方受旱总面积的17.4%;安徽省次之,受旱面积为 117.8×10^4 hm^2,占南方受旱总面积的 15.2%;湖北、湖南和江苏省受旱面积 83.9×10^4—108.0×10^4 hm^2,占比在 10%—14%之间;云南、广西、贵州、重庆、江西和广东省受旱面积 45.0×10^4—60.6×10^4 hm^2,占比在 6%—8%之间;浙江、福建和海南受旱面积 26.6×10^4 hm^2以下,占比在 5%以下;海南省年平均受旱面积最小,为 10.7×10^4 hm^2,占南方受旱总面积的 1.4%。

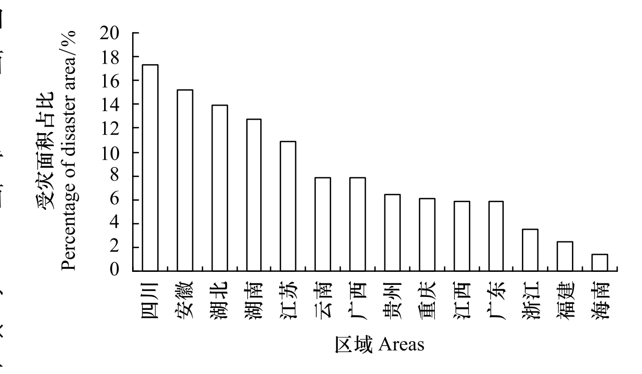


图 4　中国南方历年平均受旱面积区域分布

Fig. 4　The distribution of average drought area regional in Southern China

2.2.2　干旱受灾面积时间变化

1951—2014 年我国南方干旱年均受旱面积 774.0×10^4 hm^2(图 5),干旱受旱面积最大的是 1978 年,达到 1889.5×10^4 hm^2。近 64 年南方干旱受旱面积呈波动上升趋势,线性拟合趋势倾向率为 28.02×10^4 hm^2/10a;其中,西南区域干旱受旱面积显著上升(图 5),线性拟合倾向率为 31.3×10^4 hm^2/10a(P<0.01),即每 10a 干旱受

旱面积增加 31.3×10^4 hm^2;华南略呈波动上升(图 5)、长江中下游区域略呈波动下降(图 5)。

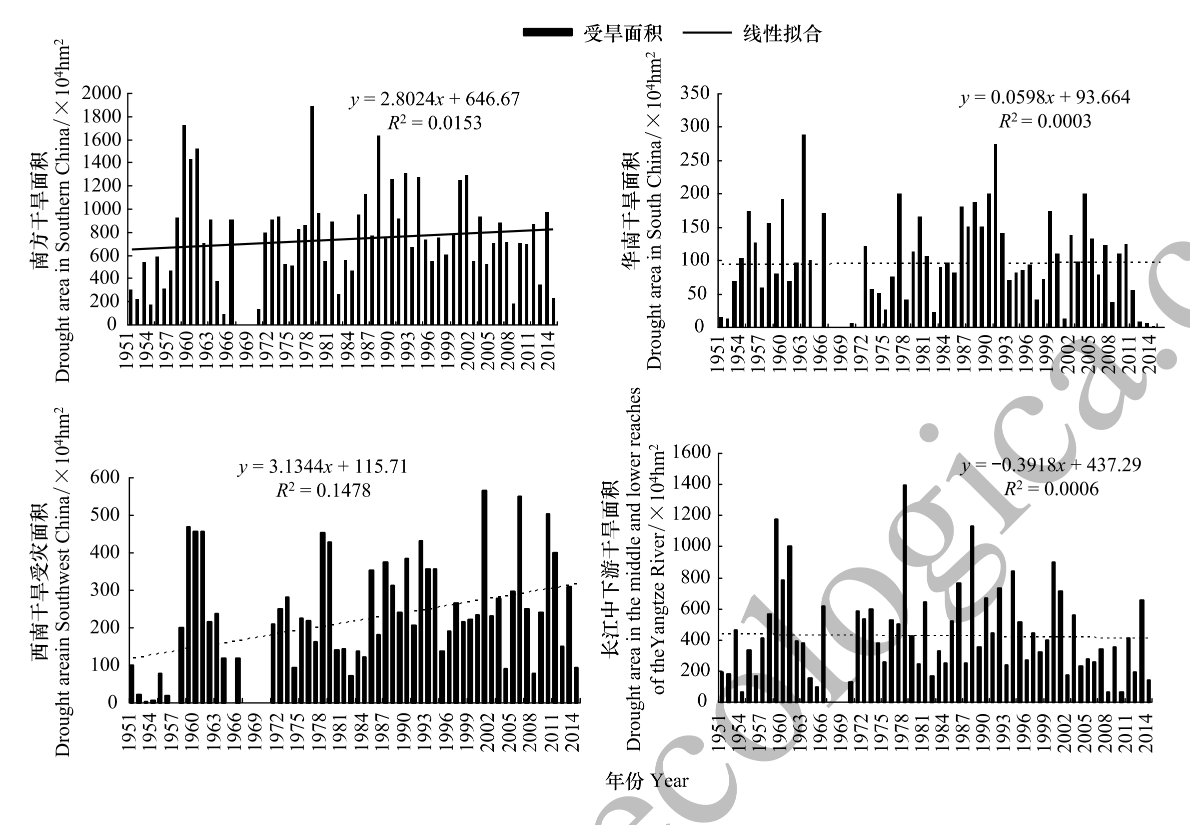


图 5 南方及华南、西南和长江中下游地区农作物干旱受灾面积变化

Fig.5 The changes crop drought affected area in Southern China and South China and Southwest China and the middle and lower reaches of the Yangtze River

2.3 干旱灾害风险特征

2.3.1 典型区域干旱灾害风险评估

选择西南、华南区域为典型区域进行干旱灾害风险评估。根据公式(3),考虑干旱致灾因子的强度和概率、承灾体的社会物理暴露度(考虑自然环境条件)、承灾体脆弱性、孕灾环境的敏感性、应对和恢复力(防灾减灾能力)。应用层次分析法得到典型区域干旱灾害风险分布评估(图 6)。

可见,西南、华南区域高干旱灾害风险区包括云南省中东部、川东部盆地;次高干旱灾害风险区包括云南省大部、川西高原、川西南山地和川东部盆地大部;中等干旱灾害风险区包括云贵高原、川西高原、川西南山地和四川东部、广西中西部和广东南部。

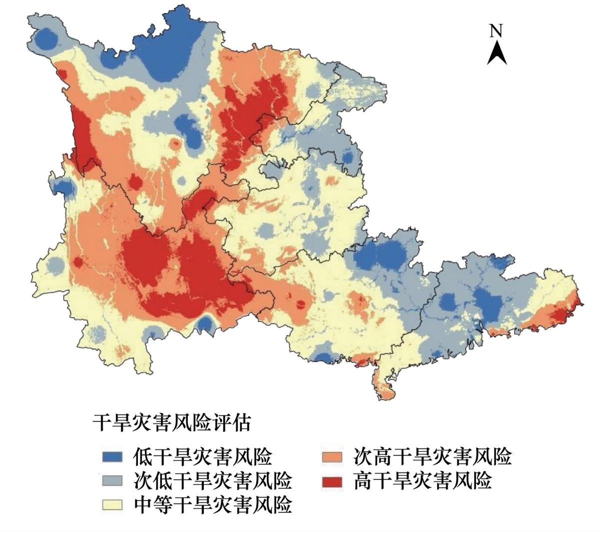


图 6 典型区域干旱灾害风险分布评估

Fig.6 The assessment of the drought risk distribution in typical area

2.3.2 气温突变前后典型区域干旱灾害风险变化特征

中国南方气候变暖,气温升高的突变年出现在 1997 年左右。图 7 给出了气温突变前后典型区域干旱灾害风险变化特征。气温突变前高干旱灾害风险区主要在云南省中东部、和广东南部沿海,气温突变后高干旱灾害风险区主要在云南省东北部、四川东部。气温突变前次高干旱灾害风险区主要在云南省大部、川北山区、广东南部,气温突变后次高干旱灾害风险区扩展到云贵高原、四川东部、广西中西部。

可见,气温突变后次高干旱灾害风险区明显扩大。

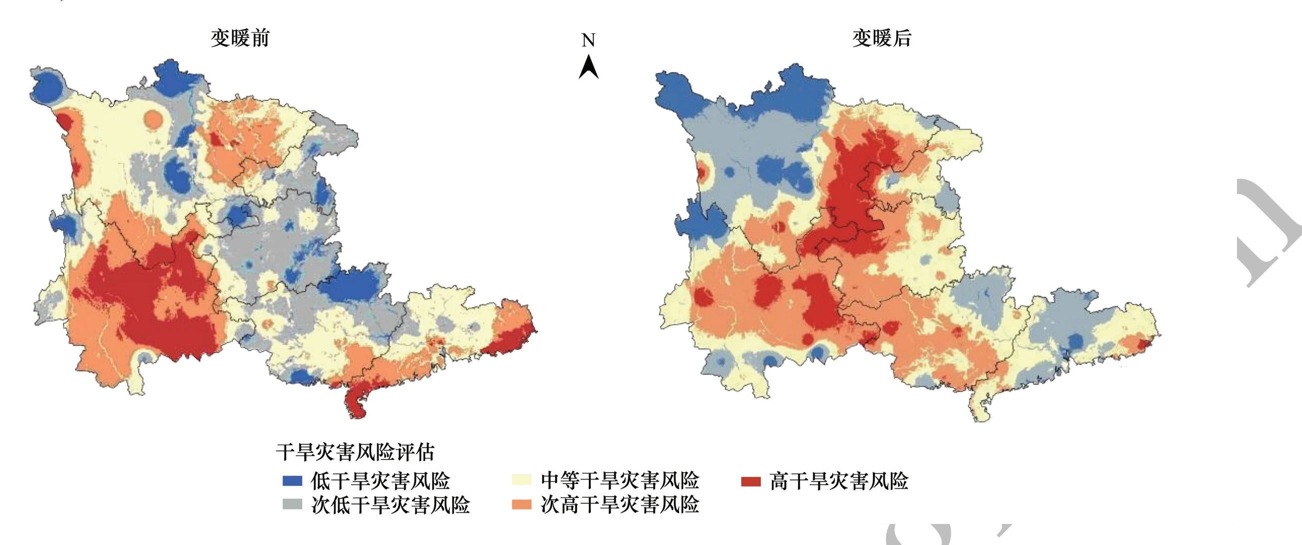


图 7　气温突变前后典型区域干旱灾害风险变化特征

Fig.7　Characteristics of drought disaster risk in typical regions after temperature abrupt change

2.3.3　重旱风险概率分布

由干旱受灾面积变化分析可知,西南干旱受灾面积呈显著增加趋势;进一步分析干旱风险概率,在气温变暖突变后,重旱风险高发区主要集中于西南,包括四川中东部、云南中东部、贵州大部、重庆大部和湖北西部;上述区域随着气候变暖,干旱灾害频率、强度和受旱面积均增加,干旱灾害风险增大。

2.3.4　未来干旱灾害预测

基于 CMIP5 集合预估的结果显示,在中等(RCP4.5)和高(RCP8.5)温室气体排放情景下,未来(2016—2025 年)我国南方地区的升温幅度约为 0.6—0.7℃。在高温室气体排放情景下,华南多数地区和江南地区东部出现-2%的降水减少,其余地区仍然是 2%以内的降水增加。在两个情景下,整个南方地区都将出现年降水日数的减少,且在高温室气体排放情景下减少幅度更大,多数地区年降水日数减少超过 2 d。在中等温室气体排放情景下,江淮、江汉和江南西部地区的年连续无降水日数也增加约 1 d;在高温室气体排放情景下,干旱日数增加的范围扩大到整个南方地区,且变化幅度也有增强(图 8)。

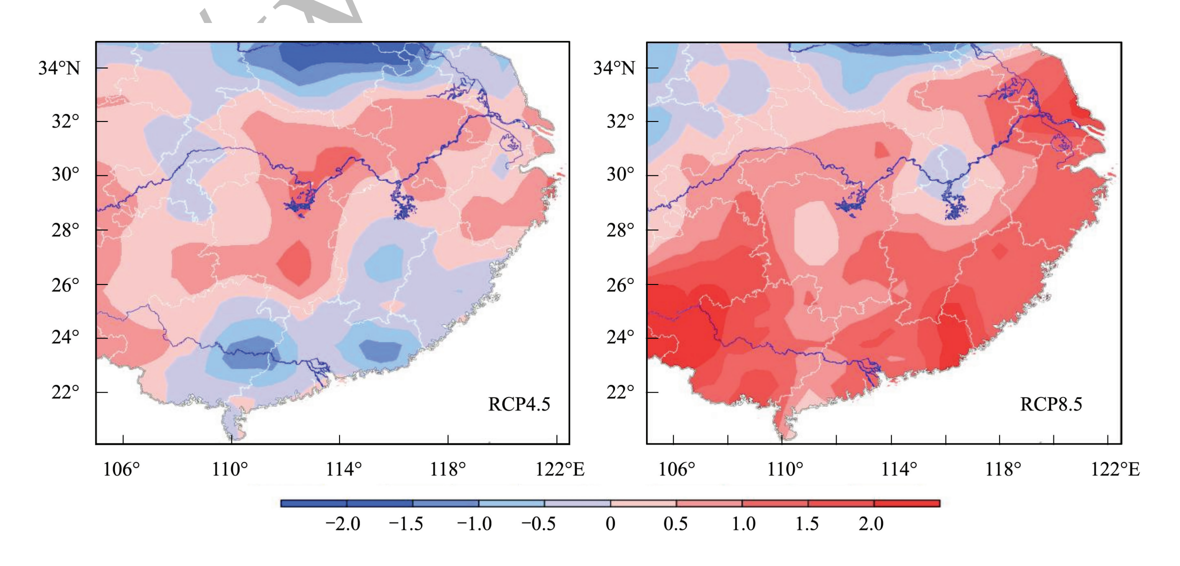


图 8　RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,2016—2025 年连续无降水日数(CDD,单位:d)变化的空间分布(相对 1986—2005 年)

Fig.8　The space distribution of days change of without precipitation in RCP4.5 and RCP8.5 scenarios (2016—2025)

3 南方干旱灾害风险管理与防控技术对策

干旱灾害风险管理通过设计、实施和评价各项战略、政策及措施,以增进对干旱灾害风险的认识,通过减少、转移灾害风险,促进备灾、应对灾害和灾后恢复措施的不断完善。其目标是提高人类的安全、福祉、生活质量、应变能力和可持续发展[4]。

3.1 干旱灾害风险管理策略结构

图 9 给出了针对不同风险控制因子的干旱灾害风险控制策略结构概念模型。(1)对于致灾因子高危险性区域,采取科学措施干预、影响致灾因子,其主要策略包括加强人工增雨,提高露水利用效率, 规避高危险期(即暴露期与高危险期错开),地膜覆盖减少蒸发等措施。(2)对于承灾体高暴露性区域,提高承灾体的抗旱机能,主要策略包括开发抗旱植物品种,提高干旱适应性;实施产业多样化战略,减少社会经济脆弱性;退耕或移民工程,减少干旱承灾体暴露度;改变作物生长期,缩短干旱承灾体暴露时间。(3)对于孕灾环境高敏感区域,改善干旱孕灾环境的条件,主要策略包括改善生态环境,提高水分涵养能力;改进水文条件,增强水资源保障能力;改进土壤条件,提高土壤保墒能力。(4)对于防灾减灾能力弱区域,要多方面增强干旱防灾能力,主要策略包括加强干旱减灾技术开发、加大抗旱工程建设;提高公众抗旱科学素养等多方面措施;加强干旱监测预警,提高风险管理能力。

图 10 给出了针对不同风险承受领域的干旱灾害风险控制策略结构概念模型。针对农业领域干旱灾害风险,(1)开展风险预警,建立干旱气象灾害的监测预警及响应体系;(2)风险规避,形成可以有效规避干旱风险的精细化种植模式;(3)风险控制,提高农田干旱灾害风险防控标准,适应发展多元化和规模化经营;(4)风险应对,加强农业干旱适应技术的研发和推广,建立农业干旱灾害政策保险制度。

针对水资源干旱灾害风险,(1)开展风险预警,建立干旱气象灾害的监测预警及响应体系;(2)风险防控,提高水利工程和供水系统的安全运行标准,加强水资源调蓄管理和决策系统,严格落实“三条红线”制度;(3)风险应对,加强重点区域防洪抗旱减灾体系建设,利用市场机制优化水资源配置效率。

针对生态系统干旱灾害风险,(1)风险控制,建立自然生态红线和生态补偿机制,提高典型生态系统干旱灾害防御能力;(2)风险应对,加强区域生态恢复和干旱灾害防控的试点示范,实施生态移民、旅游开发和生态保护项目。

3.2 干旱灾害风险防控技术对策

在干旱灾害风险管理策略的基础上,根据不同区域、不同领域干旱灾害影响和风险分布特征,提出具体风险防控技术对策。

3.2.1 干旱灾害高风险区域实施人工影响天气,开发空中水资源

干旱灾害高风险区域既是降水量偏少的区域,也是农业旱灾综合损失率大的区域,如云贵高原区域,该区域位于西南水汽通道,大气云系水资源有 20%左右形成降水,约 80%流出该区域,开发空中水资源潜力巨大。人工影响天气是干预干旱致灾因子的重要手段,通过干旱时段人工增雨,开发利用空中水资源以提高水资源利用效率,减轻干旱危害,降低干旱灾害风险。

3.2.2 态环境脆弱区域实施生态环境修复

干旱灾害风险大、生态环境脆弱性高的云贵高原、广西大部及长江中上游区域,干旱灾害风险大与区域生态、自然环境相关,通过生态环境修复,降低承灾体脆弱性。实施退耕还林(还草),农林结合,发展农、林、牧复合型生态农业,恢复良好的生态环境。保护和发展生态防护林、水源涵养林,建立平衡、稳定的生态系统。提高生态系统的抗逆性和可恢复性,增加干旱灾害风险防御能力。

3.2.3 农业主产区域以保障粮食安全为主,综合施策应对农业风险

干旱灾害对农业生产的风险主要是增加了粮食生产的不稳定性,加剧了农业气象灾害和农业病虫草害,增加农田管理和农牧业生产成本,威胁粮食安全。为此,针对农业领域风险建议采取综合对策,建立农业应对

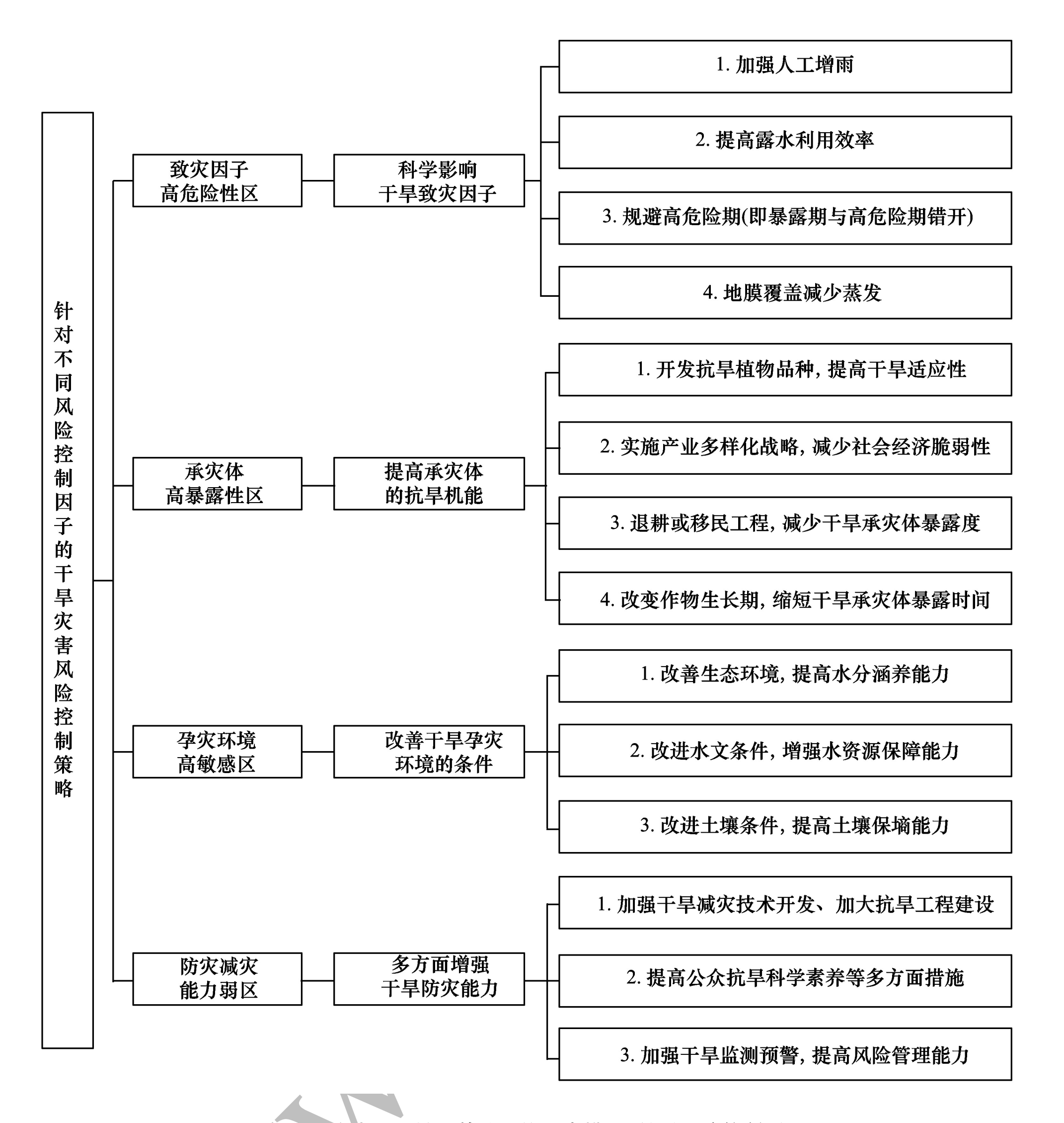


图 9　干旱灾害风险控制策略结构概念模型(针对风险控制因子)

Fig.9　The concept model on control strategy structural of drought risk

气候变化和天气气候灾害的监测、预警、响应和防灾减灾服务体系,加强农业防灾减灾规划和基础设施建设,提高农田水利工程的灾害风险防护标准,完善农业灾害政策保险制度。在农业主产区开展农业抗旱防涝示范区建设,细化农业气候区划,调整作物栽培方式、种植结构和种植制度,探索更具适应性的农林地、草地等资源管理模式;加强农业节水、抗旱、防涝、抗逆和保护性耕作等适应技术的研发、培训与推广。

3.2.4　围绕解决水资源时空分布不均和资源供需加剧矛盾,合理利用水资源

干旱灾害对水资源的风险主要是使水资源时空分布的不均匀加剧,区域水资源供需矛盾加剧;需水量增加,资源趋紧,约束加大;水文干旱、极端降水及城市洪涝风险加大,威胁水生态与水环境安全。针对水资源领域风险建议完善极端水文和天气气候事件的监测和应急管理体系,提高水利工程和供水系统的安全运行标准,加强重点城市、重点河流湖泊水库、防洪保护区和重旱地区的防洪抗旱减灾体系建设。利用市场机制优化水资源配置效率,推动水权改革和水资源有偿使用制度,鼓励雨洪利用、循环水、海水和盐碱水淡化等节水技术和节水产品研发和应用,应对未来水资源短缺。

3.2.5　围绕国土资源可持续利用,降低干旱灾害对国土资源的影响风险

干旱灾害对国土资源的风险主要是影响土地资源质量及可持续利用,增加土地治理与保护成本;加剧水土保护、地质安全和环境保护压力;引发或加剧泥石流、地面塌陷、滑坡、山体崩塌等地质灾害风险。针对国土

不同风险承受领域的干旱灾害风险控制策略结构概念模型

- 农业
  - 风险预警
    - 建立干旱气象灾害的监测预警及响应体系
  - 风险规避
    - 形成可以有效规避干旱风险的精细化种植模式
  - 风险控制
    - 1. 提高农田干旱灾害风险防近代标准
    - 2. 适应发展多元化和规模化经营
  - 风险应对
    - 1. 加强农业干旱适应技术的研发和推广
    - 2. 建立农业干旱灾害政策保险制度
- 水资源
  - 风险预警
    - 1. 建立干旱气象灾害的监测预警及响应体系
    - 2. 加强抗旱应急水源工程设施体系建设
  - 风险控制
    - 1. 提高水利工程和供水系统的安全运行机制标准
    - 2. 加强水资源调蓄管理和决策系统
    - 3. 严格落实“三条红线”制度
  - 风险应对
    - 1. 加强重点区域防洪抗旱减灾体系建设
    - 2. 利用市场机制优化水资源配置效率
- 生态系统
  - 风险控制
    - 1. 建立自然生态红线和生态补偿机制
    - 2. 提高典型生态系统干旱灾害防御能力
  - 风险应对
    - 1. 加强区域生态恢复和干旱灾害防控的试点示范
    - 2. 实施生态移民、旅游开发和生态保护项目

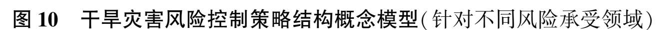


图 10 干旱灾害风险控制策略结构概念模型(针对不同风险承受领域)

Fig.10 The concept model on control strategy structural of drought risk

资源的风险建议加强土地总体规划,重视资源环境承载力评估,开展重大工程气象地质灾害风险评估,加强土地资源开发利用、监管与保护。综合采取工程措施和生态修复措施,减轻水土流失和地质灾害,加强矿山地质环境保护与恢复治理工程。加强地质环境监测与综合预警,减轻洪涝干旱引发的灾变地质环境事件对社会经济带来的不利影响。

4 结论与讨论

1961—2015 年中国南方区域降水量呈现波动变化,降水量线性拟合趋势特征不明显。但进入 21 世纪后南方区域平均降水量明显偏少,且平均降水量年际振荡幅度增大。近 55 年南方研究区气温呈显著上升趋势,南方平均地表气温升高速率高于全球地表升温速率;南方研究区平均气温在 20 世纪 80 年代前均为负距平,



之后距平≥0℃,且变异系数增加,气温振荡幅度加大。近 55 年南方研究区气温从 1976 年开始持续上升,气温升高的突变年在 1997 年。四川省年平均受旱面积最大,占南方受旱总面积的 17.4%;安徽省次之,西南区域干旱受旱面积显著上升。重旱风险高发区主要集中于西南,随着气候变暖,干旱灾害频率、强度和受旱面积均增加,干旱灾害风险增大。气温突变后次高干旱灾害风险区明显扩大。

未来 10 年(2016—2025 年)与 1986—2005 年相比,我国南方地区的升温幅度约为 0.6—0.7℃。整个南方地区年降水日数将减少,在江淮、江汉和江南西部地区,连续干旱日数将增加,意味着未来随着温室气体排放浓度的升高,我国南方地区的干旱发生频率可能升高。

提出的"干旱灾害风险形成机理概念模型"对干旱灾害风险形成地认识更加深入,有创新,不仅揭示了干旱灾害风险的形成机理,也揭示了其可变性与动态过程特征。干旱灾害具有自然与社会双重属性,应该以自然科学和社会科学相结合的视角来认识干旱灾害。干旱灾害风险评估也要在深入认识干旱气候规律的同时,重视对生态环境和社会经济系统的综合研究,干旱风险评估的理论和方法也要将气象学与其他科学相融合。干旱灾害风险管理要在遵从干旱发生发展的自然规律的基础上,体现干旱风险共担原则和经济最优化原则等社会经济学规律[17]。

气候变暖背景下,中国南方干旱灾害频率增高、强度增强、影响范围增大,农业旱灾综合损失率增加。但对于干旱灾害对农业、水资源和生态系统的风险及其机制的系统性认识还比较欠缺,加强干旱灾害风险科学评估与对策研究尤为重要。风险评估是认识风险本质和决定风险水平的过程。在研究干旱灾害致灾因子危险性、承灾体的暴露度(脆弱性)和孕灾环境敏感性的基础上[22-25],进行干旱灾害风险评估与对策研究,由被动抗灾向主动防御灾害转变,为灾害管理和防御提供科学依据。

参考文献(References):

[1] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 罗哲贤, 张存杰, 李栋梁, 王润元, 王劲松, 陈添宇, 肖国举, 张书余, 王式功, 郭铌, 白虎志, 谢金南, 杨兴国, 董安祥, 邓振镛, 柯晓新, 徐国昌. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213.

[2] Mishra A K, Singh V P. A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 2010, 391(1/2): 202-216.

[3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[4] Allen S K, Barros V, Burton I, Campbell-Lendrum D, Cardona O D, Cutter S L, Dube O P, Ebi K L, Field C B, Handmer J W, Lal P N, Lavell A, Mach K J, Mastrandrea M D, McBean G A, Mechler R, Mitchell T, Nicholls N, O'Brien K L, Oki T, Oppenheimer M, Pelling M, Plattner G K, Pulwarty R S, Seneviratne S I, Stocker T F, Van Aalst M K, Vera C S, Wilbanks T J. Summary for Policymakers //IPCC, ed. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation- Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012: 1-19.

[5] 王劲松, 张强, 王素萍, 王莺, 王静, 姚玉璧, 任余龙. 西南和华南干旱灾害链特征分析. 干旱气象, 2015, 33(2): 187-194.

[6] 黄荣辉, 刘永, 王林, 王磊. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析. 大气科学, 2012, 36(3): 443-457.

[7] 李忆平, 王劲松, 李耀辉. 2009/2010 年中国西南区域性大旱的特征分析. 干旱气象, 2015, 33(4): 537-545.

[8] 罗伯良, 李易芝. 2013 年夏季湖南严重高温干旱及其大气环流异常. 干旱气象, 2014, 32(4): 593-598.

[9] Lu J, Vecchi G A, Reichler T. Expansion of the Hadley cell under global warming. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6): L06805.

[10] Neelin J D, Münnich M, Su H, Meyerson J E, Holloway CE. Tropical drying trends in global warming models and observations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(16): 6110-6115.

[11] Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. Climate Dynamics, 2008, 31(1): 79-105.

[12] 张强, 韩兰英, 郝小翠, 韩涛, 贾建英, 林婧婧. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性. 气象学报, 2015, 73(6): 1092-1103.

[13] 姚玉璧, 王莺, 王劲松. 气候变暖背景下中国南方干旱灾害风险特征及对策. 生态环境学报, 2016, 25(3): 432-439.

[14] 刘晓云, 王劲松, 李耀辉, 杨金虎, 岳平, 田庆明, 杨庆华. 基于 Copula 函数的中国南方干旱风险特征研究. 气象学报, 2015, 73(6): 1080-1091.

[15] 王莺, 沙莎, 王素萍, 王劲松, 姚玉璧. 中国南方干旱灾害风险评估. 草业学报, 2015, 24(5): 12-24.

[16] 王莺, 王静, 姚玉璧, 王劲松. 基于主成分分析的中国南方干旱脆弱性评价. 生态环境学报, 2014, 23(12): 1897-1904.

[17] 张强, 韩兰英, 张立阳, 王劲松. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. 地球科学进展, 2014, 29(1): 80-91.

[18] Feyen L, Dankers R. Impact of global warming on streamflow drought in Europe. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D17): D17116.

[19] Tol R S J, Leek F P M. Economic analysis of natural disasters // Downing T E, Olsthoorn A A, Tol S J R, eds. Climate, Change and Risk. London: Routlegde, 1999, 308-327.

[20] 张强, 张良, 崔县成, 曾剑. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.

[21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 36-69.

[22] 杨晓光, 李茂松, 霍治国. 农业气象灾害及其减灾技术. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[23] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.

[24] 张继权, 严登华, 王春乙, 刘兴朋, 佟志军. 辽西北地区农业干旱灾害风险评价与风险区划研究. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(3): 300-306.

[25] 张强, 王润元, 邓振镛. 中国西北干旱气候变化对农业与生态影响及对策. 北京: 气象出版社, 2012: 442-448.